

Para el enlace entre España y Francia en Alta Velocidad

# Anteproyecto del túnel del Pertús

Andrés LÓPEZ PITA, Alain BOCABERTEILLE, y Alfonso GONZÁLEZ. AEIE-SEM.  
Daniel ANDRÉ. SNCF.  
Benjamín CELADA, y José Miguel GALERA. GEOCONTROL, S.A.

Palabras clave: ALTA, VELOCIDAD, ANTEPROYECTO, EXCAVACIÓN, FRENTE, SECCIÓN, SONDEO, TERRENO, TIPOLOGÍA, TRAZADO, TÚNEL.

Los estudios para la construcción del túnel de conexión ferroviaria en alta velocidad entre España y Francia (Figueres-Perpignan), fueron iniciados por la empresa *Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya*, a finales de los años 80; proseguidos al inicio de los 90 por la SNCF francesa y, definitivamente relanzados, a mediados de los 90 por la Agrupación Económica de Interés Europeo *SUR EUROPA-MEDITERRÁNEO* (AEIE SEM). Como resultado de todos los trabajos realizados, que incluyen las actividades de la Comisión Intergubernamental Española-Francesa creada para supervisar este proyecto, a finales del año 2000 se redactó el anteproyecto de este túnel; cuya génesis y contenido se resumen en este artículo.

La conexión ferroviaria en alta velocidad entre España y Francia, se ha previsto a través de un tramo denominado *internacional* que unirá las poblaciones de Figueres y Perpignan; que, en principio, será objeto de una concesión para su explotación.

En este tramo, para pasar bajo las estribaciones costeras de los Pirineos, está prevista la construcción del *Túnel del Pertús* que tendrá una longitud de unos 8.200 m; de los cuales sólo unos 800 m están en España.

## Trabajos previos

En los apartados siguientes se resumen los trabajos previos más importantes que se han realizado a lo largo de una década sobre el *Túnel del Pertús*, que se han centrado en el reconocimiento del terreno, en la definición de la tipología del túnel, y en los procedimientos de construcción.

### Reconocimiento del terreno

Para el reconocimiento del terreno que debe ser excavado para construir el túnel, se

han realizado unos 9.200 m de sondeos, en varias campañas, lo cual proporciona un ratio de *1,1 m de sondeo / m de túnel*, que se considera muy satisfactorio, de acuerdo con los criterios de *Hoek y Palmieri* (1998). Además, este ratio puede ser considerado como excelente, si se tiene en cuenta que el espesor medio del recubrimiento de este túnel oscila entre 100 y 200 m.

Específicamente, para reconocer el terreno en las proximidades de la *Falla de Le Boulou*, se construyó un pozo de 4,6 m de diámetro útil y 36 m de profundidad, así como una galería de reconocimiento de 22 m<sup>2</sup> de sección transversal y 55 m de longitud. También fue objeto de una atención especial la *Falla de Montesquieu*, que transcurre próxima al emboquille Norte del Túnel.

El resultado de los trabajos realizados está contenido en los siguientes documentos:

- Túnel transfronterizo del Pertús. Estudio geológico-geotécnico del terreno. *Geocontrol, S.A.* (agosto, 1996).
- Investigaciones realizadas en el Pozo y Galería de Le Boulou (Francia). *Geocontrol, S.A. - ACS* (julio, 1998).
- Resultados preliminares de estudios de

actividad reciente de la Falla de Montesquieu. *GEO-TER* (abril, 1999).

- Reconocimiento y estudios hidrogeológicos efectuados a partir de sondeos profundos. *CGS* (abril, 2000).

*Picquand et al* (1997), han publicado una síntesis sobre las características de los terrenos afectados por la excavación del túnel del *Pertús*.

La investigación realizada ha permitido dividir dicho túnel en seis tramos homogéneos, desde el punto de vista geomecánico, descritos desde la boca Norte a la Sur, que tienen las características que se indican a continuación:

- *Pizarras negras* (pk 0+000 a 0+820). Se denominan también pizarras de *Montesquieu* y se caracterizan por ser rocas de mala calidad, con un *RMR* que varía entre 30 y 25. Este tramo está limitado, en el emboquille Norte, por la *Falla de Montesquieu* que afectará al falso túnel de la boca Norte; pero no a la excavación en subterráneo. En el otro extremo el tramo está limitado por la *Falla de Le Boulou*, que ha sido ampliamente investigada con el Po-

zo y la galería del mismo nombre. *Celada et al.* (1997).

- **Gneises** (pk 0+820 a 1+830). Este tramo está formado por los gneises de *Las Alberas* que son rocas de calidad media, con valores de **RMR** entre 53 y 45. Este tramo está surcado por pequeñas fallas que, localmente, hacen bajar el **RMR** a 35 puntos. El nivel de agua sobre el túnel oscila entre los casi 100 m en la zona de *Les Chartreuses du Boulou* y los 220 m hacia el pk 1+500.
- **Dioritas y anfibolitas** (pk 1+830 a 3+280). Es un tramo compuesto por rocas de varios tipos; pero de buena calidad; pues su **RMR** está comprendido entre 62 y 52 puntos. La carga hidráulica en este tramo es elevada, superior a 200 m, y sólo al final del tramo llega a ser de 130 m aproximadamente.
- **Falla de Mas Anglade** (pk 3+280 a 3+375). La presencia subparalela de la falla de *Mas Anglade*, a lo largo de 95 m, hace que este tramo sea uno de los de peor calidad geomecánica con **RMR** comprendidos entre 35 y 24. La carga hidráulica, en este tramo, es de unos 120 m aproximadamente.
- **Esquistos y granodioritas** (pk 3+375 a 5+630). Este tramo está integrado por un 27% de esquistos verdes de *Mau-*

*reilles-Les Clases*, un 55% de granodioritas y el resto corresponde a zonas tectonizadas debido a la presencia, subparalela al túnel, de la falla de *Sant Climent* entre los pk 3+670 y 3+800, así como ente los pk 4+150 y 4+416. El **RMR** de estos terrenos está comprendido entre 41 y 42; por lo que deben calificarse de calidad media-mala. La carga hidráulica media del tramo oscila alrededor de 100 m.

- **Granodioritas** (pk 5+630 a 8+171). Este tramo está formado por la granodiorita del *Pertús*, que tiene un **RMR** comprendido entre 72 y 52 puntos. Aunque la calificación de este terreno debiera ser la de bueno, la presencia de zonas milonitizadas y bandas con foliaciones hace necesario relegar la codificación de este tramo.

En el **Cuadro I** se presentan, para cada uno de los tramos anteriores y las cuatro fallas más importantes, las características geotécnicas que se consideran representativas de su comportamiento.

**Tipología del túnel**

El *Túnel del Pertús* se ha previsto para que pueda ser utilizado para tráfico mixto de mercancías y viajeros, éstos últimos viajando a un velocidad de 300 km/h.

A lo largo de los trabajos realizados, para definir la solución actualmente propuesta, se ha considerado que dicho túnel debiera

tener el gálibo necesario para asegurar las funciones de autovía ferroviaria, permitiendo el transito de remolques de camión transportados en plataformas ferroviarias específicas.

Dado que las legislaciones española y francesa permitirán la explotación de una línea de alta velocidad con un túnel de 8,2 km de largo, con dos vías de circulación; en todos los estudios realizados, hasta 1999, se contempló la tipología de un único túnel con dos vías y la de dos túneles con una vía cada uno.

En el **Cuadro II** se presentan las características más relevantes de las distintas tipologías estudiadas para el *Túnel del Pertús*.

Sin embargo, a raíz del incendio ocurrido el 24 de marzo de 1999 en el *Túnel del Montblanc*, tras ponderar detalladamente todos los aspectos relacionados con la seguridad y los costes, el Comité Técnico que estaba estudiando el *Túnel del Pertús* decidió proponer que se adoptara para este túnel la tipología de dos túneles gemelos de una sola vía cada uno.

Una vez adoptada la solución bitubo, los trabajos se orientaron a definir la sección que debería tener cada túnel, la separación entre los túneles y las galerías de comunicación entre ellos; aspectos que se han definido en la fase de Anteproyecto.

**Procedimientos de excavación**

La importante longitud del *Túnel del Pertús*, que superará los 8 km, hizo que además de las técnicas convencionales de excava-

TRAMO	LITOLOGÍA (S) PRINCIPAL (ES)	PK	ROCA INTACTA			RMR	MACIZO ROCOSO						OBSERVACIONES
			d (v/m <sup>2</sup> )	w (%)	σ <sub>c</sub> <sup>i</sup> (MPa)		σ <sub>c</sub> <sup>m</sup> (MPa)	C (MPa)	θ (°)	E (MPa)	v	Carga Hidráulica	
1	ESQUISTOS NEGROS	0+000 - 0+765	2,60	3,15	17,6	27 (30-25)	0,3	0,08	30	1,267	0,26	H2 (H1)	Existen tres zonas de fallas
F1	FALLA DE LE BOULOU	0+765 - 0+820	2,50	10,0	0,6	32 (37-30)	0,2	0,05	25	383	0,3	H1	Se incluyen el tramo de gouje esquistoso y nefítico
2	NEISES	0+820 - 1+830	2,69	0,3	48,7	50 (53-45)	3,0	0,55	50	7,878	0,26	H3 (H2)	Existe una importante falla (Creu del Signal)
3	DIORTAS / ANFIBOLITAS	1+830 - 3+280	2,87	0,1	132,2	57 (62-52)	12,1	2,15	51	29,323	0,2	H3	Pequeña zonas tectonizadas (esquistos)
F2	FALLA DE MAS ANGLADE	3+280 - 3+375	2,49	2,0	9,4	30 (35-24)	0,2	0,05	26	1,904	0,3	H3	
4	ESQUISTOS / GRANITOIDES	3+375 - 5+340	2,83/2,75	0,2/0,3	96,4/58,2	42 (47-35)	7,5/2,5	1,25/0,56	53/35	7,067/3,383	0,2/0,22	H3 (H2)	Existen tres subtramos similares y varias fallas de menor envergadura
F3/F4	FALLA DE SANT CLIMENT	3+670 - 3+800 4+150 - 4+415	2,49	2,0	9,4	27 (29-25)	0,2	0,05	26	815	0,3	H2	Al ser subparalela afecta en dos tramos
5	ESQUISTOS VERDES	5+340 - 5+630	2,75	0,3	58,2	41 (47-35)	2,5	0,56	35	6,486	0,22	H2	Existe una pequeña falla
6	GRANODIORITAS (6.1)	5+630 - 6+440	2,69	0,3	87,6	54 (72-38)	7,9	1,1	50	12,528	0,28	H3 (H2)	Existen algunas bandas miloníticas
	GRANODIORITAS (6.2)	6+440 - 7+280	2,72	0,3	108,1	61 (72-52)	12,4	1,62	51	21,674	0,26	H3	Existen bandas miloníticas y pórfidos
	GRANODIORITAS (6.3)	7+280 - 8+200	2,72	0,3	80,7	45 (65-30)	3,5	0,41	43	9,707	0,32	H2	Incluye la falla F5 (Fort de Bellegarde) 7+380 al 7+440

CUADRO I.- Características geotécnicas de los terrenos.

VELOCIDAD km/h	SECCIONES NECESARIAS		TIPOLOGÍA DEL TÚNEL	
			2 túneles de 1 vía	1 túnel de 2 vías
350	Libre sobre la cota de carril (m <sup>2</sup> )		2 x 65	85
	Excavación (m <sup>2</sup> )	Circular	2 x 104	129
		Convencional	2 x (86-91)	108-115
300	Libre sobre la cota de carril (m <sup>2</sup> )		2 x 55	75
	Excavación (m <sup>2</sup> )	Circular	2 x 80	115
		Convencional	2 x (68-73)	95-102
250	Libre sobre la cota de carril (m <sup>2</sup> )		2 x 46	65
	Excavación (m <sup>2</sup> )	Circular	71	104
		Convencional	2 x (62-65)	86-91

**CUADRO II.-  
Tipologías  
estudiadas  
para el Túnel  
del Pertús.**

En la Fig. 2, se presenta el perfil longitudinal de trazado del *Túnel del Pertús*; se inicia con una pendiente de 16,5 milésimas, en la boca francesa, y finaliza con 18 milésimas en la boca española. En la mayor parte del Túnel la pendiente es de 11 milésimas, ascendiendo desde Francia a España.

**Sección transversal**

Para cada uno de los tubos del *Túnel del Pertús*, en el anteproyecto redactado, se prevé una sección libre sobre la cota de carril de 52 m<sup>2</sup>; lo cual, para una geometría circular, supone un radio interno de 4,5 m.

En las Figs. 3 y 4, se presenta la definición de la sección transversal del túnel, en el supuesto de que sea construido con tuneladora y mediante un método convencional.

En ambos casos se ha previsto que la catenaria, para una alimentación monofásica a 25 kV y 50 Hz, esté situada a 5,6 m sobre la cota de carril.

También se ha previsto que el túnel esté equipado con ventiladores tipo *jet*, con un sistema de captación de líquidos peligrosos y una acera de 70 cm de ancho para la evacuación de peatones.

**Ramales de conexión**

Los dos tubos del *Túnel del Pertús* tendrán una separación, entre ejes, de 30 m y estarán conectados por ramales, situados entre sí a no más de 800 m de distancia.

ción se estudiara la posibilidad de construirlo con una tuneladora.

Por ello, a lo largo de 1999, se realizó un estudio detallado del mercado de tuneladoras centrándose sobre todo en las orientadas a la excavación de túneles de gran diámetro, en rocas duras.

Después de analizar detalladamente los datos proporcionados por los principales fabricantes y tras tener en cuenta algunos incidentes importantes que se habían producido en la utilización de tuneladoras de gran diámetro, Wallis (1998), se llegó a la conclusión de que, en el momento actual, el límite tecnológico de las tuneladoras de roca dura no permite fabricar excavadoras de más de 12 m de diámetro.

Esta conclusión invalidaba la opción de utilizar una tuneladora para construir el *Túnel del Pertús* en la hipótesis de adoptar la tipología de un único tubo de dos vías. No obstante lo anterior, dado que la tipología finalmente adoptada fue la de dos tubos de una sola vía, la posibilidad de construir el Túnel, con tuneladora, volvió a ser interesante, en 1999.

*Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS-98), y la Instruction Technique Interministerielle de securité n° 98300, del 8-07-1998.*

**Trazado**

El Túnel del Pertús se inicia en Francia, en la Comuna de Le Boulou y, finaliza en España, en las proximidades de Figueres (Girona).

En la Fig. 1 se presenta la planta y el alzado del túnel, incluyendo la descripción de los terrenos atravesados; en concordancia con lo expuesto en el apartado de reconocimiento del terreno.

En planta el trazado sigue, sensiblemente, la alineación N-S con curvas muy suaves; que, en Francia tienen un radio mínimo de 7.692 m y de 6.000 m en España.

**Contenido del proyecto**

En los apartados siguientes se presentan los datos más significativos del Anteproyecto del *Túnel del Pertús*, que se terminó de redactar a finales de 2000.

**Condiciones del Anteproyecto**

El túnel ha sido previsto para la circulación mixta de trenes de viajeros, a una velocidad de 300 km/h, y de mercancías, que podrían transportar mercancías clasificadas como peligrosas, a 120 km/h.

Se ha previsto que el *Túnel del Pertús* pueda desempeñar el papel de autopista ferroviaria, permitiendo el tránsito de remolques de camión sobre plataformas ferroviarias.

El anteproyecto del *Túnel del Pertús* se ha redactado respetando las disposiciones de la

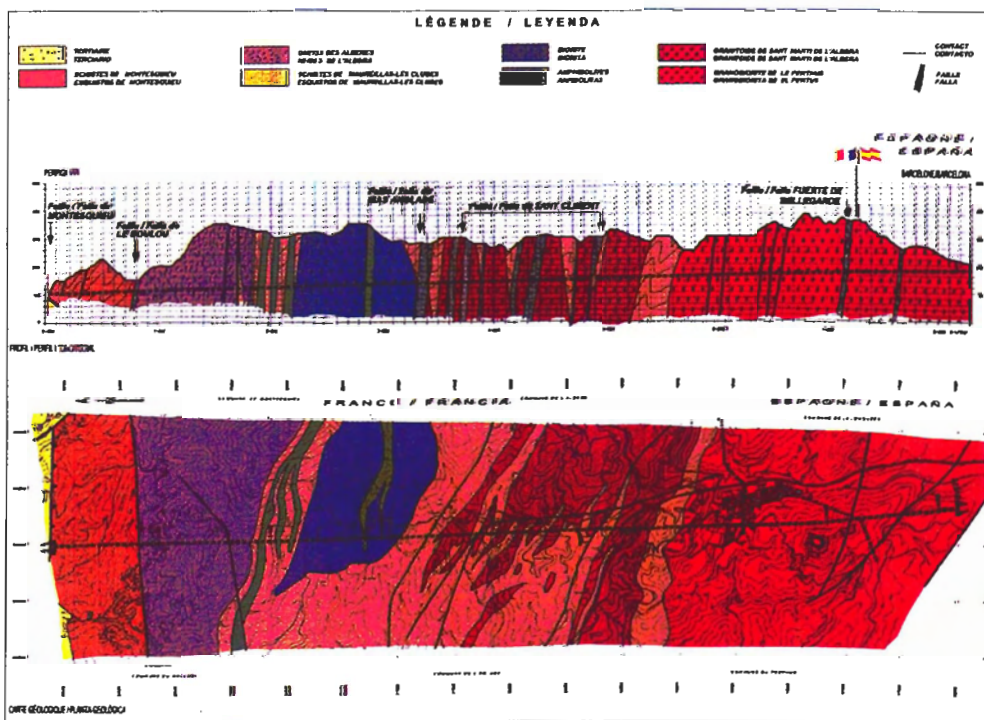


Fig. 1.- Planta y perfil del Túnel del Pertús.

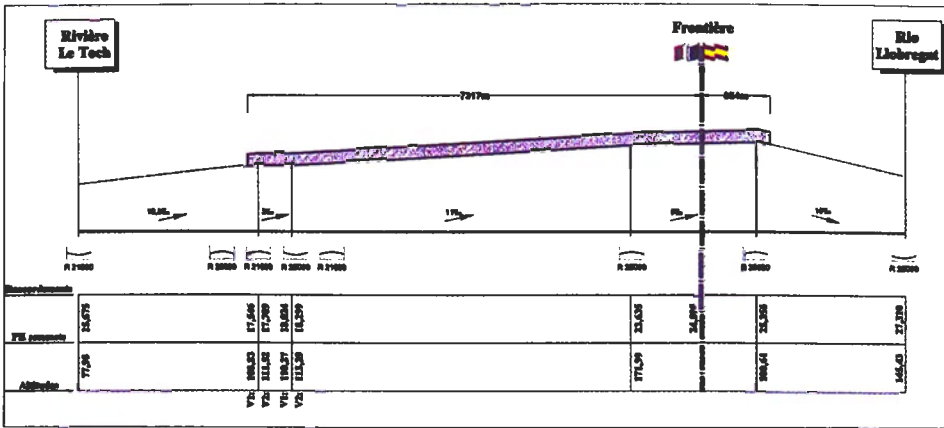


Fig. 2.- Perfil longitudinal del Túnel del Pertús.

Los ramales de conexión tendrán una anchura útil de 2,8 m, lo cual habilita el paso de cuatro personas simultáneamente, con una altura mínima de 2 m. En la Fig. 5 se presenta la definición de los ramales de conexión previstos.

**Método de construcción**

Dado que la tipología de doble tubo supone dos excavaciones con un diámetro aproximado de 10 m; tanto el método tradicional como la utilización de tuneladoras se consideran como alternativas posibles para construir el Túnel del Pertús.

**Construcción con método tradicional**

Dada la naturaleza de los terrenos a atravesar, la mayor parte del túnel deberá ser excavado con explosivos; exceptuando el tramo de pizarras negras de Montequieu y los pasos de las fallas, que podrán ser excavados por medios mecánicos.

Se ha previsto que la excavación se realice prácticamente a sección completa; ya que la primera fase de la excavación se ha previsto, suponga, el 85 % de la excavación total.

En los tramos considerados difíciles se estima necesario realizar sondeos de reconocimiento en el frente de avance con objeto de definir, con precisión, el terreno que se va a encontrar.

Se han previsto seis Secciones Tipo de sostenimiento, la mayor parte de las cuales se ejecutarán con bulones de anclaje repartido y hormigón proyectado.

En los terrenos más difíciles, paso de fallas o zonas tectonizadas, se ha previsto la colocación de cerchas metálicas pesadas, tipo HEB, complementadas con un paraguas pesado e incluso reforzando el frente mediante bulones de fibra de vidrio.

El revestimiento considerado es a base de

hormigón encofrado, con un sistema de impermeabilización que permitirá un drenaje parcial del terreno; salvo en las proximidades de Le Boulou (pk 0+680 a 0+880) y bajo el Fuerte de Bellegarde (pk 6+700 a 7+100) donde se considera necesaria una impermeabilización total para no interferir a las fuentes naturales existentes en esas zonas.

Se considera que los métodos tradicionales se pueden adaptar muy bien a las variaciones en la calidad de los terrenos y, exigen una inversión reducida; aunque, como aspecto negativo, se estima muy difícil hacer más de 140 m/mes, por cada frente de avance.

**Construcción con tuneladora**

La construcción con tuneladora presenta la ventaja de poder conseguir avances comprendidos entre 300 y 500 m/mes; siempre que la tuneladora se adapte bien a las características del terreno a excavar.

Los terrenos que se deben atravesar en la construcción del Túnel del Pertús, tal como se ha expuesto en el apartado de reconocimiento del terreno, son sumamente heterogéneos; ya que, en este túnel, coexisten las pizarras negras de Montequieu, que son de muy mala calidad geotécnica, con los granitoides del Pertús que son rocas de buena calidad.

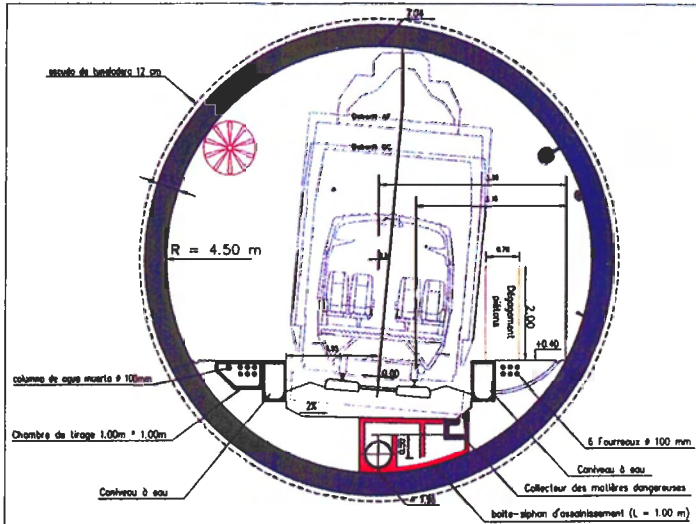


Fig. 3.- Sección transversal de un tubo del Túnel del Pertús, si se construye con tuneladora.

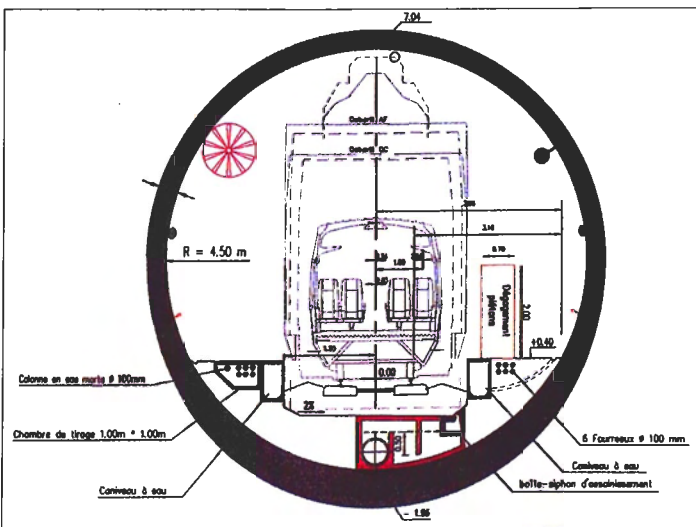


Fig. 4.- Sección transversal de un tubo del Túnel del Pertús, si se construye con el método tradicional.

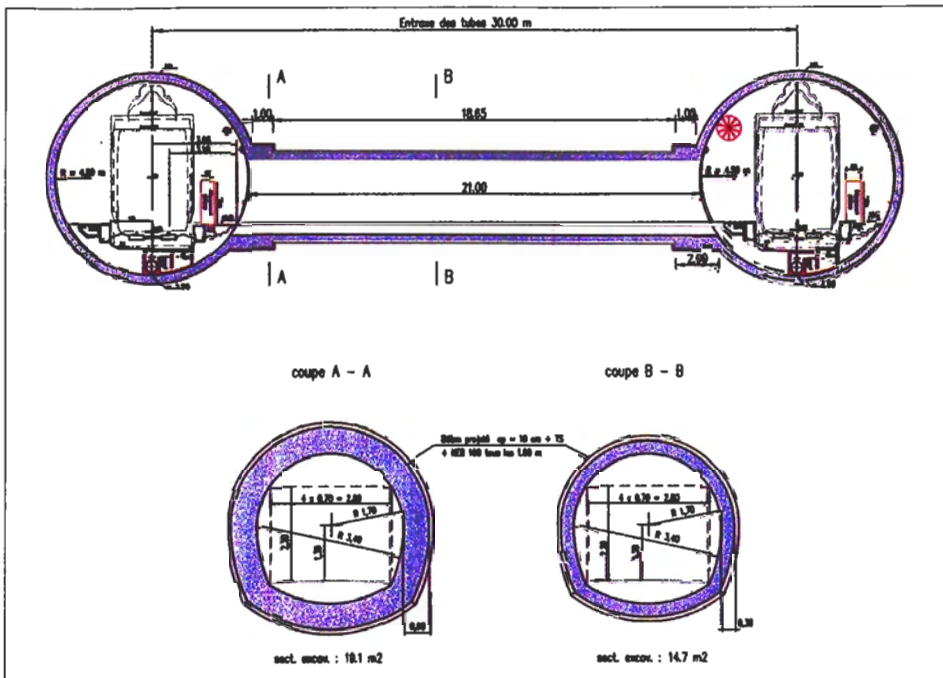


Fig. 5.- Definición de los ramales de conexión

Por ello es difícil encontrar un tipo de tuneladora que se adapte muy bien al conjunto de terrenos; aunque si fuera necesario decidirse por una sola máquina, en el momento actual, se considera que ésta debería ser del tipo *Doble Escudo*.

No obstante, dada la importante longitud del túnel a construir se ha pensado en que los tramos mejores, más próximos a la boca española, de los dos túneles podrían construirse con una tuneladora clásica de roca dura (*TBM*) reservando el doble escudo para los tramos de peor calidad.

Normalmente el revestimiento del túnel se hará, al utilizar tuneladoras, con dovelas de hormigón; aunque, en el caso de emplear una *TBM* en los tramos de mejor terreno, no se descarta ejecutar el revestimiento con hormigón encofrado.

**Frentes de ataque**

Como mínimo se han previsto dos frentes de ataque para construir el *Túnel del Pertús*, uno en cada boca; pero, para poder conseguir un plazo de ejecución más corto, sobre todo si se usa un método convencional, se ha previsto un ataque intermedio.

En la boca Norte puede conseguirse una plaza de obra, de dimensiones suficientes y para habilitar los accesos, sólo hay que recondicionar un camino rural, ensanchándolo a 8 m, a lo largo de 900 m.

Por lo que se refiere a la boca Sur tampoco son necesarias grandes obras para acce-

der, desde la Carretera N-II, al lugar denominado *El Panissars*.

En el caso del ataque intermedio se debe construir un plano inclinado que permitiría el acceso al túnel a unos 3.150 m de la boca Sur. Este plano inclinado, con una pendiente del 12 % y una longitud de 625 m, se empezaría a construir en las inmediaciones del antiguo edificio de la Aduana francesa, hoy abandonado.

En la *Fig. 6*, se presenta la definición del ataque intermedio que, con una anchura de 5,7 m y una altura de 6,85 m, tendría una sección excavada de 45 m<sup>2</sup>.

**Costes y plazos**

En el anteproyecto redactado se ha estimado que el coste, sin impuestos, del Túnel del Pertús será de 315,3 M€ si se construye en método tradicional con tres frentes de ataque, y de 309,7 M€ si se utilizan dos tuneladoras.

Los correspondientes plazos de construcción son de 47 y 42 meses, respectivamente.

En el *Cuadro III* se presentan los datos más característicos de los costes y plazos estimados para la construcción del *Túnel del Pertús*.

Actualmente, se considera que la construcción con el método tradicional presenta un grado menor de incertidumbre que en el caso de que se utilizaran tuneladoras; sobre todo por que, en el momento actual, no se tiene datos suficientes para definir con precisión el tipo de tuneladora que se debe utilizar en esta obra. Esto hace que el margen de fluctuación de costes en la construcción convencional se haya estimado en ±10%; mientras que si se utiliza tuneladora las variaciones podrían oscilar entre el +30 y -10%.

Durante la redacción del proyecto de construcción se espera poder obtener la informa-

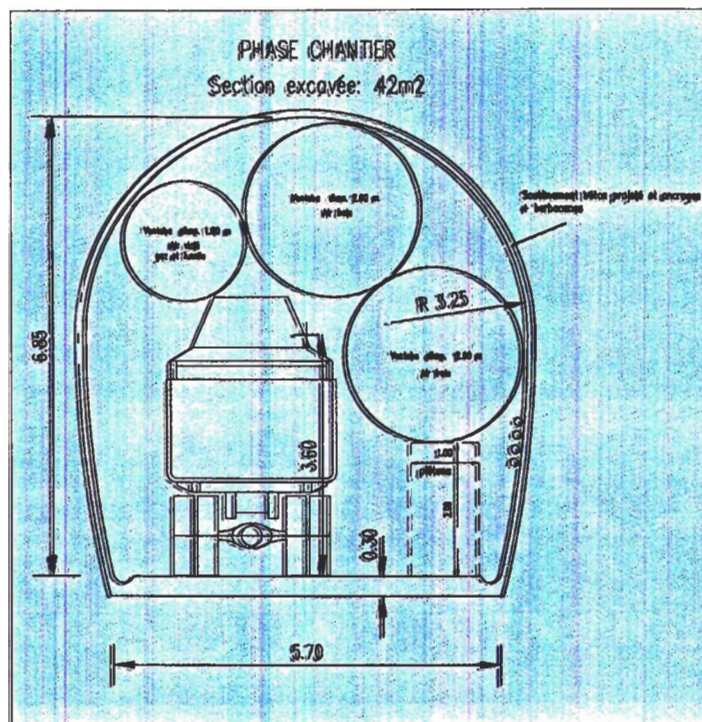


Fig. 6.- Definición del posible ataque intermedio.

CONCEPTO	MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN	
	TRADICIONAL	MECANIZADO
Coste de la Obra Civil del Túnel (M€)	283,6	279,1
Coste de los equipamientos de seguridad (M€)	31,7	30,6
Coste total del túnel sin impuestos (M€)	315,3	309,7
Fluctuaciones previstas del coste (%)	±10	+30/-10
Plazo de construcción (meses)	47	42
Coste unitario (M€/km)	38,45	37,7

**CUADRO III.-**  
Costes y plazos  
estimados.

### Bibliografía

- CELADA, B.; GALERA, J.M.; GONZÁLEZ, A.; ROLLAND, A. Rock Mass characterization of the weak zones at the Perthus Tunnel.
- Tunneling under difficult conditions and Rock Mass classifications. *I.T.C. Basel, 27-29 Oct, 1997.*
- HOEK, E.; PALMIERI, A. Geotechnical risks on large civil engineering projects. Keynote address for Theme 1. *Dat. Ass. of Eng. Geolog. Congress. Vancouver, Canada. 21-25 Sep, 1998.*
- PICQUAND, J.L.; LE MOUËL, A. Le Project de Tunnel du Perthus. *Journées d'études internationales de Chambéry. AFTES. 21-24 Oct, 1996.*
- WALLIS, S. Pinglin perseverance in Taiwan. *Tunnel 7/98.*

ción necesaria para reducir las incertidumbres existentes.

Hay que señalar que también se ha estudiado la opción de construir el túnel con tres tuneladoras; de las cuales una sería una *TBM* abierta y trabajaría sólo en los granitoides del *Pertús*; realizándose el revestimiento en este tramo con hormigón encofrado el lugar de dovelas.

Se estima que esta solución rebajaría el plazo de ejecución a 38 meses; aunque el coste de esta opción no se ha evaluado con precisión, pues depende notablemente de la amortización de la tuneladora y, por lo tanto, de su valor de adjudicación que podría, a su vez, variar notablemente en función de que la tuneladora fuera nueva o usada.

REFERENCIA 103



**DYWIDAG SISTEMAS  
CONSTRUCTIVOS, S.A.**

**DYWIDAG SISTEMAS  
CONSTRUCTIVOS, S.A.**

P. I. Los Gallegos  
Azor, 25-27  
Tel.: 91 642 20 72  
Fax: 91 642 27 10  
E-mail: dywidag@ciccp.es

<http://profesionales.recol.es/caminos/dywidag>